

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 681.784; 551.483.5

Измеритель коэффициента ослабления водной среды в лабораторных и полевых условиях

**В.В. Белов, В.Н. Абрамочкин, А.Н. Кудрявцев, М.В. Тарасенков,
А.В. Федосов, Е.С. Познахарев***

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 19.09.2019 г.

Описан состав и принцип действия измерителя коэффициента ослабления водной среды в реальном масштабе времени, в том числе в подводных условиях. Приведены примеры испытаний измерителя в полевых и лабораторных условиях. Измеритель рекомендуется использовать для оценки предельных расстояний «приемник – источник», когда оптико-электронная связь в пределах прямой видимости или на рассеянном лазерном излучении возможна.

Ключевые слова: измерение, коэффициент ослабления оптического излучения, водная среда, полевые и лабораторные эксперименты; measurement, optical radiation extinction coefficient, water medium, field and laboratory experiments.

Введение

Многолетние и успешные исследования оптических свойств водных сред осуществляются в Институте океанологии им. П.П. Ширшова (г. Москва) и его Санкт-Петербургском филиале, в Морском гидрофизическом институте РАН (г. Севастополь), в Институте водных и экологических проблем СО РАН и других научных центрах. Накоплен обширный материал об оптических характеристиках морей и океанов [1–5], речных и озерных бассейнов на территории России [6]. Для его пополнения созданы различные оптико-электронные средства (например, [7, 8]), позволяющие измерять весь набор оптических характеристик водных сред: коэффициенты ослабления, рассеяния, поглощения и индикатрисы рассеяния. Эти средства, как правило, являются многофункциональными, достаточно сложными оптико-электронными системами (ОЭС). В то же время существует потребность иметь более простые ОЭС, позволяющие измерять коэффициенты ослабления водной среды.

Эта потребность возникает при проведении полевых экспериментов, связанных с подводной оптической связью в искусственных и естественных водоемах (озера, реки, морские акватории). Для выбора режима работы источников и приемников информационного оптического излучения необходим (хотя и не всегда достаточен) оперативный контроль такой оптической характеристики, как коэффициент ослабления β_{ext} водной среды. Для прогноза работо-

способности оптической подводной связи важно знать эту характеристику только для двух диапазонов длин волн: «синего» (424–490 нм) и «зеленого» (490–550 нм); знания оптических свойств воды в широком спектральном диапазоне не требуется.

Аппаратура для измерения коэффициентов ослабления водной среды

При выполнении экспедиционных работ с выездами, например, на реки, озера, покрытые льдом, желательно иметь малогабаритный, малой энергоемкости измеритель, позволяющий в реальном масштабе времени определять профиль $\beta_{\text{ext}}(h)$, где h – глубина погружения измерителя в воду.

В основе работы измерителя лежит закон Бутера, который связывает интенсивность излучения I_0 на входе в исследуемую среду с интенсивностью I_1 в точке ее регистрации, удаленной от источника на расстояние r :

$$I_1 = I_0 (-r \cdot \beta_{\text{ext}}). \quad (1)$$

Указанный закон справедлив для нерассеянного излучения. В нем не учтено влияние многократного рассеяния на I_1 , наблюдающегося в водной среде. Это влияние можно значительно снизить, уменьшая угол поля зрения приемной системы путем размещения перед приемной оптикой цилиндрической бленды. В численных экспериментах методом Монте-Карло установлено, что при ее длине более 3 см вклад многократного рассеянного излучения в I_1 не превышает 4% на «синей» и «зеленой» длинах волн.

Итак, для определения коэффициента ослабления β_{ext} следует измерить интенсивность излучения (или функционал от нее) в точках входа излучения

* Владимир Васильевич Белов (belov@iao.ru); Владимир Николаевич Абрамочкин (ya.wna@yandex.ru); Андрей Николаевич Кудрявцев (zoxu1@iao.ru); Михаил Викторович Тарасенков (tmv@iao.ru); Андрей Васильевич Федосов (fean2010@yandex.ru); Егор Сергеевич Познахарев (724_pes1992@iao.ru).

в водную среду и в точке размещения фотоприемника. Используя (1), получим:

$$\beta_{\text{ext}} = -\ln(I_1 / (I_0 \cdot r)). \quad (2)$$

Нами создан и испытан в лабораторных и полевых условиях измеритель коэффициентов β_{ext} (рис. 1).

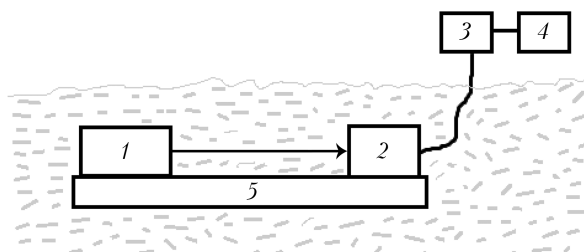


Рис. 1. Блок-схема измерителя: 1 – лазерный источник; 2 – оптический приемник; 3 – блок регистрации и индикации измерений; 4 – компьютер; 5 – платформа, на которой фиксируются блоки 1 и 2

Процедура измерения следующая. Предварительно измеряется I_0 и результаты сохраняются в компьютере 4. Прибор погружается в воду, за исключением блоков 3 и 4. Лазерное излучение из блока 1 поступает в водную среду и, ослабляясь, распространяется в направлении фотоприемника (блок 2 на рис. 1). Лазер работает в импульсивном режиме.

Сигнал с фотодиода усиливается операционным усилителем, оцифровывается микроконтроллером STM32F207 и с помощью интерфейса Ethernet передается на компьютер (блок 4 на рис. 1). Расчет коэффициентов ослабления осуществляется на компьютере с помощью программы, реализующей формулу (2).

На рис. 2 приведены фотографии платы питания и управления «зеленым» или «синим» полупроводниковым лазером (помещается в герметический бокс), оптической приемной системы, блока регистрации и индикации результатов измерения.

Во время измерений в поле зрения приемника может попадать различное количество гидрозолей, что приводит к вариациям значений β_{ext} . Измеренные значения I_1 записываются в память регистратора с частотой 1 кГц. Средние значения за период измерений и СКО β_{ext} определяются стандартным способом.

При тестировании работоспособности измерителя нами проведены серии лабораторных экспериментов с различными типами вод. В табл. 1 приведены некоторые результаты этих измерений.

Таблица 1

Результаты измерения коэффициентов ослабления различных типов вод в лабораторных условиях

Тип воды	β_{ext} ($\lambda = 450 \text{ нм}$), м^{-1}	СКО (количество измерений 10 000)
Водопровод	0,552	0,001889
Дождевая оз. Боярское (лето)	2,0134	0,005149
оз. Рожнево (лето)	3,255	0,0060
оз. Рожнево (лето)	31,131	0,1698

Примеры результатов измерения коэффициентов β_{ext} в лабораторных и полевых условиях

Для проведения лабораторных экспериментов в стационарных условиях была изготовлена кювета, в которую заливалась исследуемая вода, объемом до 50 л. В нее помещались лазерный импульсный источник излучения и фотоприемник в герметических блоках. В качестве источника (рис. 2) использовался полупроводниковый непрерывный лазер DIY на длинах волн 445–450 нм, мощностью 4 Вт, переведенный в импульсный режим с частотой повторения импульсов 5–14 кГц, средней мощностью 14–400 мВт в зависимости от длительности импульса. Угол расходимости лазерного излучения 0,5–1,0°. В качестве оптического приемника использовался фотодиод BPW 34 (OSRAM), спектральная область чувствительности – 400...1100 нм, фототок – 80 мкА, поле зрения – 120°, площадь фоточувствительного элемента площадки – 7 мм². На рис. 3 показана кювета в момент проведения измерений в лаборатории. Для исключения влияния фоновой подсветки измерения проводились в темном помещении.

Среднее значение коэффициента ослабления воды из оз. Боярское в этих экспериментах составило 3,255 м⁻¹, СКО – 0,106. В табл. 2 приведены результаты измерений коэффициентов ослабления в зависимости от глубины погружения измерителя в воду на оз. Боярское и в лабораторных условиях.

Таблица 2

Результаты измерения коэффициентов ослабления воды оз. Боярское зимой в полевых и лабораторных условиях

Глубина погружения измерителя, м	Коэффициент ослабления, м^{-1}
<i>Полевые условия</i>	
0,5	5,348
1,0	5,303
1,5	5,223
2,0	5,029
2,5	4,645
<i>Лабораторный эксперимент</i>	
Кювета	4,169

Как следует из табл. 2, с увеличением глубины погружения измерителя коэффициент ослабления уменьшается. Объяснение этому может быть следующим. С появлением лунки во льду увеличивается приток кислорода в воду, что приводит к движению живых организмов в направлении лунки, повышению их активности и концентрации по мере приближения к открытому участку воды.

По данным [6], среднее значение коэффициента ослабления воды в оз. Лапа (Алтайский край) в летнее время $\beta_{\text{ext}} = 9,9 \text{ м}^{-1}$, в зимнее – $4,8 \text{ м}^{-1}$. Это озеро по некоторым признакам (непроточное, расположено близко к городу) можно отнести к тому же эвтрофному типу, что и оз. Боярское. Однако из сравнения коэффициентов ослабления вод этих озер следует, что если зимой они близки, то летом вода в оз. Лапа значительно более мутная, чем в оз. Бояр-

ское. Можно предположить, что причины этого – интенсивность посещения озер населением, стоки атмосферных аэрозолей и др.

Заключение

Создан измеритель коэффициентов ослабления водных сред, прошедший испытания в полевых условиях в летнее и зимнее время (подо льдом) и в лабораторных условиях. Полученные результаты не противоречат имеющейся в литературе информации о подобных измерениях, выполненных, например, в лабораторных условиях [6]. Измеритель может быть рекомендован для оценки предельных расстояний «источник – приемник» в системах оптической связи в пределах прямой видимости или на рассеянном лазерном излучении. Знание этого параметра в реальном масштабе времени важно для оценки возможности осуществления такой связи при заданных характеристиках и параметрах систем оптической связи.

Работа выполнена в рамках Приоритетного направления П.10 программы фундаментальных исследований ИОА СО РАН, проекта П.10.3.3. «Прямые и обратные задачи зондирования атмосферы и земной поверхности, атмосферная коррекция и коммуникационные оптико-электронные системы на рассеянном лазерном излучении».

V.V. Belov, V.N. Abramochkin, A.N. Kudryavtsev, M.V. Tarasenkova, A.V. Fedosov, E.S. Poznakharev.

Instrument for measuring the water extinction coefficient under laboratory and field conditions.

The composition and operation principle of an instrument for measuring the water extinction coefficient in real time are described, including measurements in water under the ice surface. Examples of instrument testing under field and laboratory conditions are given. The measuring instrument is recommended for estimation of maximal receiver–source distances when line-of-sight optoelectronic communication or communication on scattered laser radiation is possible.

Авторы благодарны директорам ИОА СО РАН Г.Г. Матвиенко и И.В. Пташнику за поддержку (в том числе финансовую) своих исследований в полевых условиях.

1. *Оптика океана и атмосферы* / К.С. Шифрина (ред.). М.: Наука, 1981. 231 с.
2. *Оптика океана*. Т. 1. Физическая оптика океана / А.С. Моница (ред.). М.: Наука, 1983. 372 с.
3. *Оптика океана*. Т. 2. Прикладная оптика океана / А.С. Моница (ред.). М.: Наука, 1983. 236 с.
4. *Ли М.Е., Мартынов О.В.* Некоторые результаты исследований индекса цвета в море // *Морские гидрофиз. исслед.* 1976. № 1(72). С. 133–139.
5. *Маньковский В.И.* Параметры индикатрис рассеяния света в тропических водах Атлантического океана // *Оптика атмосф. и океана*. 2018. Т. 31, № 8. С. 634–639; *Mankovsky V.I.* Parameters of scattering phase functions in tropical Atlantic Waters // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 6. P. 604–610.
6. *Суторихин И.А., Букатый В.И., Акулова О.Б.* Спектральная прозрачность воды в разнотипных озерах Алтайского края. Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2015. 145 с.
7. *Ли М.Е.* Логарифмический фотометр-прозрачномер // *Приборы для научных исследований и системы автоматизации в АН УССР*. Киев: Наукова думка, 1981. С. 89–90.
8. *Латушкин А.А., Мартынов О.В.* Способ определения спектрального показателя ослабления света в морской воде “in situ”. (RU 2 605 640 C2 G01N 21/59), 2016.

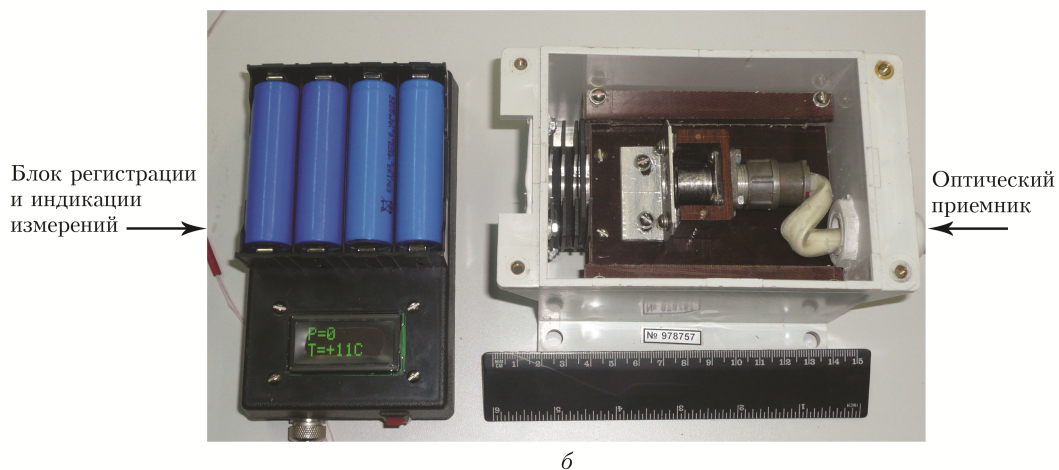
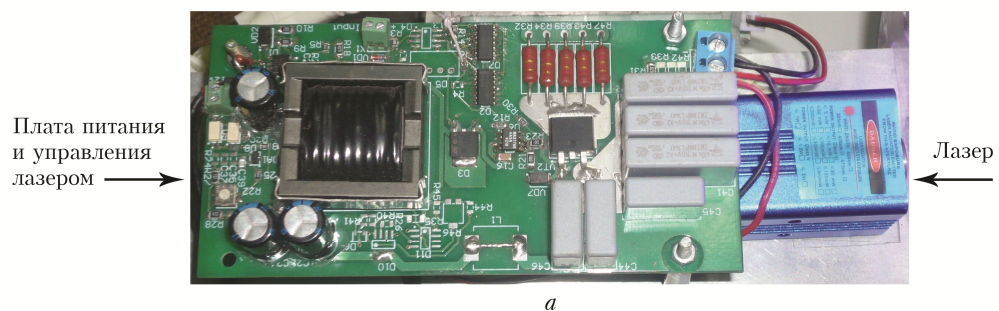


Рис. 2. Блоки 1–3 (см. рис. 1): *a* – плата питания и управления «зеленым» или «синим» полупроводниковым лазером (12,2 × 6,0 см); *b* – оптическая приемная система, блок регистрации и индикации результатов измерения

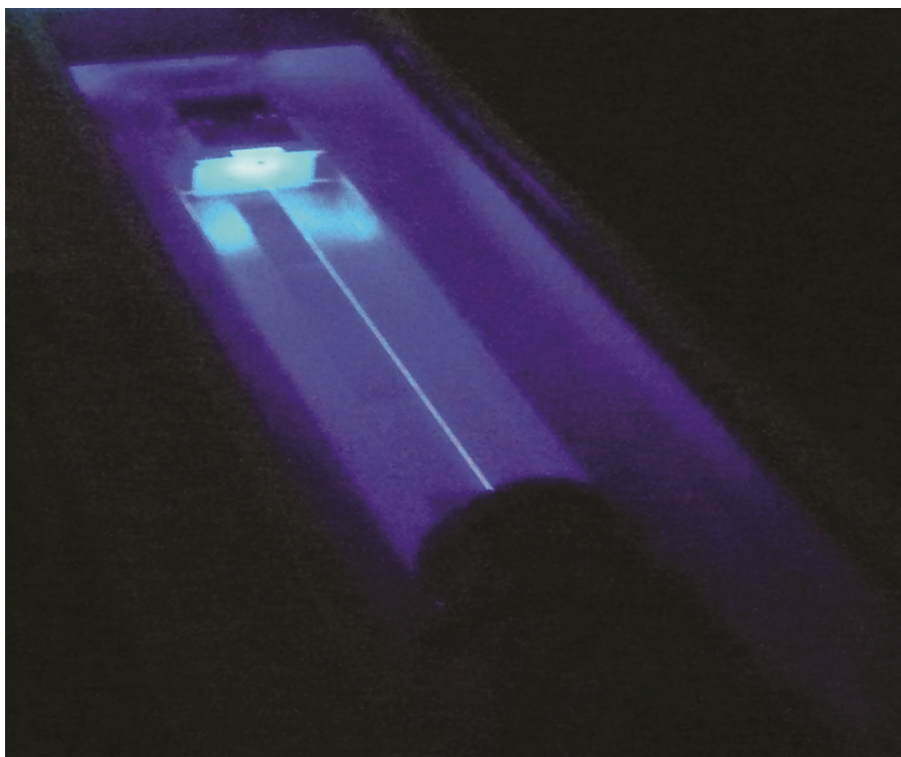


Рис. 3. Кювета во время измерений коэффициента ослабления летней воды оз. Боярское (август 2019 г.)